



С. О. ХОМУТОВ

**СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ НАДЕЖНОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ
КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ
И ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ**



ООО «МЦ ЭОР»
Барнаул - 2015



УДК 621.313.004.67 (075.8)
ББК 31.261.2 я 73-1

Хомутов, С. О. Система поддержания надежности электрических двигателей на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции [Электронный ресурс] : монография / С. О. Хомутов. – Электронные данные. – Барнаул : ООО «МЦ ЭОР», 2015. – 1 эл. опт. диск (CD-R); 12 см.
– Рекомендуемые системные требования: ПК с част. ЦП 800 МГц и выше; Windows XP и выше; дисковод CD-ROM; Adobe Reader или др. программа для чтения файлов формата PDF. - Загл. с этикетки диска.

ISBN 978-5-9907546-0-7

В электронном издании рассмотрены вопросы создания системы поддержания надежности электрических двигателей, эксплуатируемых в промышленности и сельском хозяйстве, путем разработки методов и технических средств комплексной диагностики, а также теоретического обоснования способа интенсификации процессов тепломассопереноса и практической реализации электротехнологии восстановления изоляции обмоток для обеспечения высокой эффективности производства и улучшения условий труда обслуживающего и ремонтного персонала. Издание рассчитано на специалистов в области эксплуатации, обслуживания и ремонта электрооборудования, студентов специальности «Электроснабжение» и направления «Электроэнергетика и электротехника», преподавателей вузов, научных работников и аспирантов.

Рецензенты: А. А. Багаев, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» (АлтГАУ);
А. Г. Якунин, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Информатика, вычислительная техника и информационная безопасность» (АлтГТУ).

ISBN 978-5-9907546-0-7

© Хомутов Станислав Олегович, 2015
© Электронное издание. ООО «МЦ ЭОР», 2015

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Как известно, необходимым условием безубыточной работы и эффективного функционирования в рыночных условиях любого сельскохозяйственного предприятия является минимизация всех производственных издержек, которая достигается путем анализа бизнес-процессов, процессов обеспечения и менеджмента с последующим применением современных технических средств и электротехнологий. Системный анализ данных процессов позволил из комплекса существующих проблем низкой эффективности технологических процессов в сельском хозяйстве выделить проблему обеспечения безотказной работы установленного на предприятии электрооборудования (ЭО), решение которой определяется надлежащей организацией системы повышения его надежности.

Исследования в области повышения эксплуатационной надежности электрооборудования можно условно разделить на два больших направления. С одной стороны – это работы, нацеленные на изучение и обеспечение высокого уровня надежности ЭО на стадии его проектирования и изготовления, с другой – связанные с вопросами поддержания заданного уровня надежности в ходе его технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Дополняя друг друга, данные исследования позволили в целом обеспечить определенный прогресс в сельском хозяйстве.

Особое значение вопрос повышения надежности приобретает для электрического двигателя (ЭД), как основного потребителя электроэнергии [1 – 4]. В процессе эксплуатации электродвигателей общепромышленного назначения, составляющих более половины всего парка двигателей, в условиях сельского хозяйства на интенсивность старения изоляции, как наиболее «слабого» и уязвимого элемента ЭД, влияют различные факторы: окружающая среда, режимы работы двигателя, техническое обслуживание и ремонт, а также текущее состояние электрической изоляции обмоток. В итоге, как правило, происходит ускоренное старение изоляции, результатом которого является выход ее из строя, и, как следствие, значительное сокращение реального срока службы электродвигателя по сравнению с заложенным заводом-изготовителем.

Так, выполненные в течение достаточно большого промежутка времени, начиная с 70-х годов прошлого века, и в последние годы века нынешнего на сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края и ряда других регионов России исследования [4 – 15] показали, что от общего числа отказов элементов конструкции ЭД повреждения обмоток составляют более 80 % при значительной доле выхода двигателей из строя в результате межвитковых замыканий в обмотке статора. В общем случае, из-за нарушения изоляции по-прежнему прекращают свою работу около 75 % электродвигателей, а экономический ущерб от выхода из строя одного двигателя достигает 20 тыс. руб. и более при стоимости нового ЭД – 1-8 тыс. руб. (в ценах 2009 года).

В целях недопущения простоя оборудования вследствие отказа электрического двигателя, необходим систематический контроль и своевременное

восстановление свойств изоляции. Однако на большинстве предприятий агропромышленного комплекса (АПК) система планово-предупредительных ремонтов (ППР) действует неудовлетворительно, а системный подход к учету количественно-качественных показателей выхода двигателей из строя и проведению профилактических мероприятий практически отсутствует. Наряду с этим, отмечены низкий уровень квалификации обслуживающего и ремонтного персонала, а также компьютеризации и применения новейших информационных технологий в производственном процессе [16], несмотря на то, что их использование, например, в области диагностики ЭД неизменно ведет к сокращению затрат на содержание парка электродвигателей. Об этом говорит и зарубежный опыт [17, 18].

Таким образом, существует **проблемная ситуация**, заключающаяся в необходимости увеличения срока службы электродвигателей в неблагоприятных условиях сельского хозяйства и отсутствии соответствующей данным условиям системы повышения их надежности, которая охватывала бы все стадии эксплуатации и ремонта двигателя, а также включала в себя специальный комплекс мероприятий, позволяющий проводить диагностику и необходимые восстановительные работы с минимальным участием обслуживающего и ремонтного персонала.

Глубокие теоретические исследования физических явлений, происходящих в диэлектриках, повлиявшие на качество работ в области изоляционной техники и расширившие представления о характере происходящих в изоляции процессов, а также явившиеся базисом науки об изоляции, были проведены такими известными учеными, как А. А. Воробьев, Ю. Н. Вершинин, С. Н. Койков, Г. С. Кучинский [19 – 22]. Развитию этого направления, разработке новых систем изоляции, их совершенствованию посвящены теоретические исследования Н. В. Александрова, Т. Ю. Баженовой, А. К. Варденбурга, Б. В. Кулаковского, П. М. Хазановского, А. В. Хвальковского, Л. Т. Пономарева и ряда других ученых [23 – 28].

Существенный вклад в разработку и создание методов неразрушающих испытаний изоляции электрических машин и аппаратов внесли такие крупные специалисты, как В. А. Баев, И. Е. Иерусалимов, Н. А. Козырев, труды которых хорошо известны и в настоящее время [29 – 31]. В свою очередь, обобщения в области изучения поведения различных изоляционных конструкций, большой объем экспериментальных данных, его систематизация и практическое использование нашли отражение в работах Л. М. Бернштейн, К. Н. Барэмбо, В. В. Маслова [32 – 34].

На сегодняшний день вопросы количественной оценки надежности электрических машин решаются весьма эффективно, чему немало способствовали достижения научных школ под руководством таких ученых, как О. Д. Гольдберг, Ю. П. Похолков, З. Г. Каганов, теоретические и экспериментальные работы которых известны как в нашей стране, так и за рубежом [35 – 38].

Как уже упоминалось, выход из строя электродвигателей в большинстве случаев является следствием отказов изоляции, как наиболее слабой их части. Знание механизма возникновения данных отказов во многом определяет

направления исследований в области надежности изоляции обмоток. В работах ряда российских и зарубежных ученых исследованы законы распределения отказов ЭД, разработаны модели надежности изоляции, которые позволяют воссоздать достаточно объективную картину старения изоляции обмоток [9, 39 – 41]. Однако реальные условия эксплуатации не всегда представляется возможным адекватно смоделировать. Стремление уточнить теоретические положения на основе изучения реальной картины старения изоляции наталкиваются на необходимость разработки специальных технических средств.

В среде организаций – потребителей электрической энергии сложилось мнение, что существенное влияние на срок службы изоляции электрических машин оказывают температурные воздействия. Но, как показано исследованиями многих ученых [42 – 44], снижение температуры обмоток практически не приводит к сколько-нибудь существенному повышению их надежности. Кроме того, электродвигатели в сельском хозяйстве имеют низкое число часов использования в году, что в определенных условиях может позволить пойти на увеличение коэффициента загрузки свыше единицы. Завышение нагрузки в 1,2 – 1,3 раза практически не увеличивает общие затраты на эксплуатацию, т. е. перегрузки электродвигателей могут считаться экономически оправданными, а их значения необходимо выбирать из условий целесообразного нагрева изоляции [45 – 46].

В настоящее время в эксплуатации все еще находится большое количество электродвигателей старых серий. Результаты исследований температурных полей асинхронных двигателей серии АО2 показывают, что электродвигатели данной серии имеют запас по допустимому превышению температуры статора 15 – 30 % [47]. Несколько иначе дело обстоит с двигателями серии 4А. Тепловой запас электродвигателей этой серии значительно уменьшен. Исследованиями, выполненными в Томском государственном политехническом университете, а также Челябинской государственной агроинженерной академии [37, 48 – 51], показано, что многие двигатели серии 4А в номинальном режиме имеют среднее превышение температуры обмотки статора выше допустимого. Учитывая, что коэффициент неравномерности нагрева вдоль обмотки в электродвигателях 4А лежит в пределах 1,1 – 1,2, максимальная температура любых частей будет значительно выше средней. Следовательно, увеличение коэффициента загрузки в двигателях этой серии по условиям целесообразного перегрева возможно в очень небольших пределах. Расширение пределов у электрических двигателей 4А до 1,2 – 1,3 допустимо только при условии существенного их нагрева.

В первой половине 60-х годов появился целый ряд работ в области надежности, которые определили основные их направления [52 – 56]:

- исследование эксплуатационной надежности обмоток и анализ их отказов;
- создание методов количественной оценки показателей надежности и долговечности обмоток электродвигателей;

- исследование влияния конструкционных и технологических факторов на показатели надежности обмоток ЭД;
- анализ влияния эксплуатационных факторов на надежность изоляции обмоток двигателей и механизма ее износа;
- повышение надежности обмоток электродвигателей за счет разработки и создания новых систем изоляции, изоляционных материалов, пропиточных составов.

Исследованиями по перечисленным направлениям занимаются, преимущественно, ученые и специалисты, деятельность которых связана с повышением надежности электродвигателей на стадии их проектирования и изготовления. Вместе с тем необходимо признать, что вопросу изучения эксплуатационной надежности электрических машин, особенно в последнее время, уделяется недостаточно внимания. При этом следует заметить, что методы оценки показателей надежности изоляции по данным эксплуатации, хотя и считаются одними из самых достоверных, до настоящего времени не находили широкого применения из-за их невысокой оперативности. Успехи в области разработки новых эффективных средств информационного контроля и управления позволили несколько сместить вектор исследований в сторону интереса к этим методам [57 – 59].

Системный анализ отказов изоляции обмоток показал, что отказ наступает в результате пробоя изоляции в ее «слабом месте». Сопутствующими причинами отказа являются условия эксплуатации, включающие в себя и режимы работы, и условия окружающей среды. Однако независимо от причин отказов основной характеристикой изоляции обмоток многими авторами считается величина пробивного напряжения.

Значительные уточнения механизма возникновения «слабого места» сделаны Ю. П. Похолковым в его работах, посвященных дефектообразованию и влиянию на возникновение пробоя сквозных повреждений в изоляционных покрытиях [41]. Им же было начато рассмотрение вопроса оптимизации режимов пропитки для «залечивания» таких повреждений. Но технология сушки и пропитки остается до сих пор несовершенной, трудоемкой и крайне длительной. Нет и достаточно научно обоснованных методов и подходов к ускорению процессов сушки и пропитки [4, 47, 48, 57, 60 – 63].

Большая часть сделанных теоретических предпосылок по вопросам старения изоляции нашла свое подтверждение в результатах ускоренных испытаний изоляции обмоток на надежность [64]. Теоретический фундамент и методология ускоренных испытаний были заложены О. Д. Гольдбергом [52].

Общим для работ, посвященных расчетным методам оценки надежности изоляции, является синтез математических моделей процессов старения изоляции на базе теории вероятности и математической статистики. Однако при достаточно большом количестве моделей имеют место значительные трудности их практической реализации, неуниверсальность и сложность. Кроме того, нет комплексного подхода к оценке состояния изоляции, тогда как работ, посвя-

щенных изучению влияния эксплуатационных факторов на ее надежность, существует довольно много [6, 14, 65 – 67].

Сделать какие-либо объективные выводы на основе этих исследований часто бывает затруднительно по причине их противоречивости. Существуют трудности и другого характера, например выбор и обоснование критериев оценки качества изоляции в условиях эксплуатации, выбор диагностических параметров. Выбор в качестве одного из критериев нагревостойкости изоляции не всегда бывает оправдан. При этом большая часть исследований выполняется на макетах, что в ряде случаев не отвечает реальному содержанию явлений, происходящих в изоляции, и дает противоречивые результаты.

Значительный вклад в развитие работ, связанных с исследованием эксплуатационной надежности электрооборудования и электрических систем, в т. ч. в условиях сельскохозяйственного производства, сделан видными советскими и российскими учеными И. А. Будзко, В. Н. Андриановым, И. И. Мартыненко, Л. Г. Прищепом, Г. И. Назаровым, В. Ю. Гессеном, Н. М. Зулем, Т. Б. Лещинской, Ю. А. Судником, С. П. Лебедевым, А. А. Пястоловым, Р. М. Славиным, А. М. Мусиным, Г. П. Ерошенко, А. О. Грундулисом, Ф. Я. Изаковым, В. Н. Вануриным, Н. Н. Сырых, А. М. Худоноговым, Л. А. Саплиным, В. Н. Делягиным, А. Е. Немировским, В. А. Буториным, О. К. Никольским, О. И. Хомутовым, А. А. Сошниковым и многими их коллегами [10, 63, 65, 68 – 84].

Интересны разработки А. О. Грундулиса по созданию устройств защиты электродвигателей от аварийных режимов [7], а также работы Г. П. Ерошенко по совершенствованию системы эксплуатации электрооборудования и оптимизации ее элементов [85]. В успешном решении вопросов эксплуатационной надежности электрических машин существенную роль играет созданная д. т. н., профессором А. А. Пястоловым научная школа. Выполняемые его учениками работы посвящены изучению механизма влияния на изоляцию обмоток различных факторов внешнего воздействия. При этом особую значимость эти работы представляют с точки зрения изучения агрессивных и неблагоприятных условий эксплуатации.

Одно из первых мест в вопросах повышения надежности различных сложных объектов в настоящее время отводится технической диагностике и неразрушающему контролю состояния электрооборудования. На эксплуатационном этапе жизненного цикла электродвигателя крайне важны своевременное обнаружение дефектов, определение характера и условий их развития, что достигается с помощью специальных методов и средств диагностики, а также локализация дефектов и их устранение. Большой вклад в методологию диагностирования и разработку математических моделей диагностики внесли такие ученые, как Д. В. Гаскаров, Р. А. Макаров, А. В. Мозгалевский, П. П. Пархоменко, В. П. Таран, Э. К. Стрельбицкий, О. П. Муравлев, Ю. П. Ильин, С. А. Волохов, И. А. Биргер, А. А. Стеценко, Н. В. Коньгин, В. А. Русов, В. И. Сташко и др. [39, 86 – 97]. Однако в условиях эксплуатации методы безразборной диагностики изоляции электродвигателей практически отсутствуют.

Фундаментальные исследования в области тепло- и массопереноса были выполнены такими крупными учеными, как А. В. Лыков [98] и А. В. Лебедев. Особенности кинетики и динамики вакуумной сушки, в частности, высоковольтной изоляции, посвящены работы П. С. Куца и И. Ф. Пикуса [99, 100], интенсификации процессов сушки и пропитки – работы К. Н. Барэмбо, Л. М. Бернштейн, В. И. Калитвянского, Р. С. Холодовой [33, 101 – 103].

В свою очередь, первые исследования, посвященные моделированию процессов эксплуатации различных технических элементов, были предприняты в прошлом веке математиками А. К. Эрлангом, А. Т. Пуассоном, которые дали ему название – теория массового обслуживания. Позднее, в нашей стране, данная теория активно исследовалась учеными К. М. Марковым, В. Б. Гнеденко, И. Н. Коваленко, А. Я. Хинчиным [104 – 106]. Результаты, полученные этими учеными, заложили основу современной теории массового обслуживания, позволяющей осуществлять планирование ремонтов электродвигателей на основе их диагностики. Однако большинство математических методов управления системами массового обслуживания по сегодняшний день находится в стадии теоретических исследований, а их практическая реализация требует больших временных и материальных затрат.

Таким образом, можно констатировать, что работы по изучению и обеспечению надежности электрических машин, выполняемые у нас в стране и за рубежом, уже сейчас имеют конкретный практический выход, что позволяет снизить аварийность электродвигателей. Появились новые изоляционные материалы, существенно улучшилась технология изготовления новых обмоточных проводов и в целом изоляционных конструкций. Появились новые и достаточно оперативные методы расчета показателей надежности на стадии проектирования и изготовления машин. Значительно расширились представления о механизме дефектообразования. Новое развитие получили методы математического моделирования дефектообразования и отказов изоляции обмоток. Накоплен большой статистический материал об аварийности электродвигателей и ее причинах в условиях эксплуатации.

Вместе с тем, несмотря на определенные успехи в этом направлении, **проблема** низкой эксплуатационной надежности ЭД, связанная с отсутствием теоретического обоснования комплексной оценки состояния электродвигателей, а также научно подтвержденных подходов к ускорению процессов разрушения связующего при удалении обмоток, пропитки и сушки изоляции в ходе обслуживания и ремонта, продолжает оставаться актуальной. Требуют дальнейшего развития теория прогнозирования состояния двигателей с учетом многофакторного характера воздействий, работы по созданию методов планирования сроков и объемов ТОиР ЭД. Разобщенность выполняемых в данных направлениях исследований, безусловно, снижает тот эффект, который получен от внедрения уже законченных научно-исследовательских работ, т. е. необходимость научного обобщения и системного подхода к развитию теоретических и научно-технических основ в области повышения надежности ЭО очевидна.

Зарождение научной школы в области надежности электрооборудования в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова (АлтГТУ), где выполнялась работа, относится к 1980-м годам. Комплексные исследования эксплуатационной надежности ЭО, выполненные в АлтГТУ, позволили на качественно ином уровне теоретически обосновать и практически реализовать модели деградации изоляции и прогностические модели ее состояния в течение всего срока службы. Исследования процессов тепло-массопереноса стали основой для разработки моделей пропитки и сушки изоляции, что обеспечило выход на новую ступень в создании экологически чистых энергосберегающих электротермовакuumных технологий восстановления работоспособности электрических машин.

Весь комплекс представленных в данной монографии результатов исследований выполнялся на базе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» АлтГТУ. Ряд исследований, выполненных совместно с учеными кафедры под руководством доктора технических наук, профессора Хомутова О. И., успешно завершился защитой докторской диссертации автора, в которой предложены эффективные решения задач в области обеспечения надежности эксплуатации электрооборудования.

Устойчивое развитие научных исследований невозможно без прочных связей с предприятиями и научными организациями. Многолетними партнерами в рамках выполнения совместных научно-исследовательских работ являются филиал ОАО «МРСК Сибири»-«Алтайэнерго», ОАО «Сетевая компания Алтайкрайэнерго», ОАО «Алтайэнергосбыт», ООО «Барнаульская сетевая компания», Томский политехнический университет, Московский государственный агроинженерный университет, Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства и ряд других организаций и учреждений России.

С точки зрения методологии выполнения исследования по созданию системы повышения надежности электродвигателей, эксплуатирующихся на предприятиях агропромышленного комплекса России, очевидна необходимость применения системного подхода. Разработанная система представляет собой сложную искусственную систему, в которой структура взаимосвязей и взаимозависимостей многочисленных элементов носит разветвленный, т. е. трудно прослеживаемый характер. Для эффективного исследования процессов старения и восстановления изоляции ЭД на основе системного анализа автором предложен следующий сценарий:

- постановка задачи (формулировка проблемы и цели исследований);
- построение содержательной модели рассматриваемой системы, формализация цели управления объектом и выделение возможных управляющих воздействий, влияющих на достижение цели, а также ограничений на управляющие воздействия;

- построение математической модели (перевод в ту форму, в которой для ее изучения может быть использован математический аппарат) и оптимизация;
- решение задач, сформулированных на базе построенной модели;
- проверка полученных результатов на их адекватность природе изучаемой системы, включая исследования влияния внемоделльных факторов, и корректировка первоначальной модели;
- реализация полученных решений на практике.

Кроме того, в рамках выполненной работы одной из важнейших задач системного анализа являлось определение перспективных направлений исследования, для решения которой необходимо было составить подробную и объемлющую структуру рассматриваемой системы повышения надежности электродвигателей. Полученные на сегодняшний день результаты многочисленных исследований позволили выявить следующие основные задачи повышения эксплуатационной надежности ЭД, в частности, изоляции обмоток статора, установить основные связи между ними, а также учесть взаимодействие полученной системы с внешней средой [1]:

- 1) повышение качества и интенсификация пропиточно-сушильных работ;
- 2) диагностика электродвигателей в условиях эксплуатации и прогноз их состояния на перспективу;
- 3) разработка технических средств измерения и контроля эксплуатационных и диагностических параметров;
- 4) количественная оценка степени влияния различных факторов на процессы старения и восстановления изоляции электрического двигателя;
- 5) создание системы прогнозирования состояния и планирования сроков обслуживания ЭД.

Таким образом, **целью выполненной работы** является создание системы повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве путем разработки методов и технических средств комплексной диагностики, а также теоретического обоснования способа интенсификации процессов тепло-массопереноса и практической реализации электротехнологии восстановления изоляции обмоток для обеспечения высокой эффективности сельскохозяйственного производства и улучшения условий труда обслуживающего и ремонтного персонала.

В качестве **объекта исследования** выступают процессы изменения свойств изоляции обмоток в результате ее старения и восстановления.

Предметом научного исследования является получение новых закономерностей протекания процессов изменения свойств изоляции обмоток, позволяющих осуществлять ее комплексную диагностику и эффективное восстановление в ходе эксплуатации и ремонта.

Для достижения цели работы сформулированы следующие **основные задачи**:

1) научно обосновать выбор метода оценки степени влияния факторов, воздействующих на состояние изоляции двигателя в реальных условиях эксплуатации и ремонта, а также разработать механизм и количественно оценить степень этого влияния;

2) исследовать и обосновать принципы диагностирования ЭД, а также разработать методы и современные технические средства комплексной диагностики на основе анализа закономерностей возникновения гармоник в спектре их внешнего магнитного поля (ВМП) и изменения параметров волновых затухающих колебаний (ВЗК) в обмотке при развитии различных дефектов;

3) построить математические модели, описывающие процессы старения и восстановления изоляции электродвигателей, устанавливающие взаимосвязь между параметрами переноса теплоты и массы под действием сил различной природы и значениями показателя качества изделий;

4) разработать единую эффективную электротехнологию разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции обмоток ЭД по замкнутому циклу, а также создать методику оптимизации режимов технологического процесса;

5) выполнить анализ систем массового обслуживания (СМО) и составить математическое описание параметров СМО для группы двигателей сельскохозяйственного предприятия, оперируя показателями надежности каждого ЭД с учетом всех возможных связей данной системы с внешней средой, а также осуществить постановку и решение задачи оптимизации параметров СМО;

6) разработать систему автоматизированной оценки результатов диагностики ЭД и прогнозирования наработки до очередного контроля их состояния на основе соответствующих математических моделей, позволяющих оценить остаточный срок службы электродвигателя и спланировать сроки и объемы проведения профилактических мероприятий и ремонтов.

Методы исследования. Для решения основных задач исследования использованы системная методология анализа процессов старения изоляции и тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах, методы теории подобия и моделирования с применением методов математической статистики и численных методов решения дифференциальных уравнений, логико-вероятностный метод расчета сложного изделия, математические методы оптимизации, численные методы аппроксимации функций, метод интегральных аналогов, а также методологии теории планирования экспериментов и информационно-логического анализа, обеспечивающие всестороннее исследование надежности двигателей, эксплуатирующихся в сельском хозяйстве.

Научная новизна работы. Впервые с использованием информационно-логического анализа получены модели процессов изменения свойств изоляции обмоток, дающие возможность выявить основные направления повышения ее надежности с минимальными затратами.

Построены математические модели магнитного поля двигателя и волновых затухающих колебаний в обмотке при диагностике изоляции с учетом ее состояния и конструктивных особенностей ЭД. Разработаны методы и технические средства комплексной диагностики электрических двигателей в условиях эксплуатации и ремонта, основанные на анализе гармонического состава спектра напряженности внешнего магнитного поля ЭД и параметров волновых затухающих колебаний в обмотке (*патенты №№ 2208234, 2208236, 2283503*), а также предложены критерии и методика оценки состояния ЭД в сельском хозяйстве.

Выявлены закономерности протекания процессов теплопереноса в капиллярно-пористых телах под действием градиентов давления и температуры, разработана математическая модель пропитки и сушки обмоток ЭД, устанавливающая зависимость выбранного и обоснованного показателя качества ремонта от воздействующих в процессе восстановления изоляции факторов. На основе полученной модели создана методика оптимизации режимов пропитки и сушки обмоток и объема восстановительных мероприятий.

Предложен и теоретически обоснован новый способ разрушения связующего обмоток двигателей на основе вакуумирования (*патент № 2168831*). Разработаны конструкции установок для пропитки и сушки изоляции ЭД (*патент № 2191461*).

Предложена стратегия обслуживания ЭД на предприятиях с различными технологиями ремонта для получения оптимального для заданных условий эксплуатации качества. При использовании разработанных технических средств диагностики электрических двигателей создана система прогнозирования дополнительной наработки до очередного контроля их состояния (*патенты №№ 2208235, 2283501, 2283502*).

Построена математическая модель прогнозирования изменения состояния изоляции обмоток с целью назначения новой наработки до следующей диагностики ЭД, позволяющая оценить остаточный срок службы изоляции электродвигателя при дестабилизирующем воздействии внешних факторов и определить рациональные сроки проведения его обслуживания и ремонта.

Практическая значимость результатов исследований. Результаты проведенных исследований позволили развить научно-технические основы создания единой электротермовакuumной технологии разрушения связующего, пропитки и сушки электротехнических изделий по замкнутому циклу, а также разработать и внедрить новые методы и приборы диагностики в процессе применения на предприятиях АПК, обслуживания и ремонта, обеспечивающие получение достоверной информации при сравнительно низкой стоимости и простоте использования.

Созданная электротехнология единого комплекса восстановления изоляции обеспечивает высокое качество работ по техническому обслуживанию и ремонту двигателей в короткие сроки в условиях безотходного и экологически чистого производства при экономии материальных и трудовых ресурсов, что

при совместном использовании с комплексом средств измерения и прогноза в составе системы повышения надежности ЭД значительно повышает эффективность функционирования последней.

На основе разработанных конструкций установок по пропитке и сушке и соответствующей методики оптимизации режимов их работы могут быть созданы ремонтные установки различной производительности с автоматической системой управления на основе персонального компьютера.

Полученные математические модели позволяют агропромышленным предприятиям осуществлять организацию ремонта электрических двигателей с минимальными народно-хозяйственными затратами, а созданная автоматизированная система диагностики и прогноза срока службы электродвигателей дает возможность существенно упростить процесс планирования мероприятий по обслуживанию и ремонту ЭД.

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова в соответствии с грантами 2000 и 2003 гг. «Студенты, аспиранты и молодые ученые – малому наукоемкому бизнесу «Ползуновские гранты» по темам «Тепловая вакуумная установка для восстановления изоляции ЭД» и «Оптимизация параметров технологического процесса скоростной вакуумной пропитки и сушки обмоток электрических машин»; с грантом Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых МК-7964.2006.8 на тему «Электротехнологические и технические системы повышения надежности электродвигателей» (2006-2007 гг.); с Концепцией развития электрификации сельского хозяйства России (Минсельхоз РФ, Минэнерго РФ, РАСХН / М., 2002 г.); с научно-исследовательскими работами, финансируемыми из средств федерального бюджета, по единому заказ-наряду, по заданиям Минобразования РФ в рамках тематических планов и в рамках ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» по темам: «Исследование надежности электрооборудования и разработка энергосберегающих, экологически чистых технологий его восстановления» (1995-1999 гг.), «Исследование процессов деградации и теоретические основы моделирования состояния полимерных электроизоляционных систем» (2000 г.), «Системный анализ и моделирование процессов старения и деградации изоляции электрооборудования» (2000-2004 гг.).

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы использованы и внедрены на объектах Алтайского края и других регионов России и стран ближнего зарубежья. Метод комплексной диагностики электродвигателей внедрен на ООО «ТОУРАК» Алтайского района, ООО «Техногранд» Первомайского района, филиале ОАО «ФСК ЕЭС» - Западно-Сибирское предприятие магистральных электрических сетей, Барнаульском филиале ОАО «Кузбассэнерго» Барнаульских ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, ООО «Сибпромо» г. Барнаул.

Рекомендации по пропитке и сушке изоляции ЭД в условиях сельского хозяйства, а также методика оценки состояния изоляции и технические сред-

ства диагностики внедрены на производственно-ремонтном предприятии филиала ОАО «МРСК Сибири»-«Алтайэнерго», ОАО «Барнаульский шинный комбинат», ОАО «Завод синтетического волокна», ЗАО «Шадринское», крестьянских (фермерских) хозяйствах «Юг», «Луч», «Полус» Калманского района, сельскохозяйственной артели (колхозе) «Первое мая», сельскохозяйственном производственном кооперативе «Советское», товариществе на вере «Горновское» Косихинского района Алтайского края.

Методика и рекомендации по восстановлению работоспособности электродвигателей, а также модель прогнозирования дополнительной наработки внедрены на ОАО «Алтайский приборостроительный завод «Ротор» г. Барнаула, ООО «Агропромэнерго» г. Камня-на-Оби, ЗАО «Тайнинское» и ЗАО «Горный нектар» Красногорского района, ООО «Восточное» Целинного района, ООО «АКХ «Ануйское» Петропавловского района Алтайского края.

Электротермовакuumная технология восстановления изоляции электрических двигателей, а также реализующие ее технические средства внедрены на производственно-ремонтном предприятии филиала ОАО «МРСК Сибири»-«Алтайэнерго» и на ОАО «Алтайсельэлектросетьстрой» г. Барнаула, сельскохозяйственных предприятиях ЗАО «Мичуринец» и ИП «Гущина» Алтайского района Алтайского края, на государственном унитарном предприятии «Новоалтайские межрайонные электрические сети», в филиале ОАО «МРСК Сибири»-«Горно-Алтайские электрические сети», в ТОО научно-производственное предприятие «КАН» Республики Казахстан.

Методика планирования сроков и типов ремонта электродвигателей при различных объемах выделяемых денежных средств рекомендована к применению Главным управлением сельского хозяйства администрации Алтайского края в качестве эффективной ресурсосберегающей технологии для предприятий АПК. Вероятностные модели процессов выхода из строя и восстановления электрооборудования используются отделами ППР ОАО «Барнаульский станкостроительный завод», ОАО «Русский хлеб». Система повышения эффективности процесса ремонта электрооборудования внедрена в АКГУП «Центральный» Калманского района и совхозе «Санниковский» Первомайского района Алтайского края.

Результаты работы используются в учебном процессе на энергетическом факультете Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова для студентов специальности 140211 – «Электроснабжение» и направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также в курсовом и дипломном проектировании (выполнении выпускной квалификационной работы).

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты работы были доложены и одобрены на 39 конференциях и совещаниях, включая Международную научно-техническую конференцию «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2001, 2006, 2007, 2008 гг.), III Международную научно-практическую конференцию «Интеллектуальные технологии в об-

разовании, экономике и управлении» (Воронеж, 2006 г.), Международную научно-техническую конференцию «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2006, 2009 гг.), 1-ю Всероссийскую научно-практическую конференцию молодых ученых «Материалы и технологии XXI века» (Москва, 2000 г.), Всероссийскую научно-практическую конференцию «Наука и инновационные технологии для регионального развития» (Пенза, 2003 г.), научно-техническую конференцию с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Москва, 2004, 2006 гг.), XI научно-техническую конференцию «Челябинскому государственному агроинженерному университету – 70 лет» (Челябинск, 2001 г.), 1-ю региональную научно-практическую Интернет-конференцию «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (Орел, 2001 г.), 2-ю международную научно-техническую конференцию «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт» (Тобольск, 2004 г.), 4-ю Международную научно-техническую конференцию «Электрическая изоляция – 2006» (Санкт-Петербург, 2006 г.), 4-ю Всероссийскую научно-техническую конференцию «Вузовская наука – региону» (Вологда, 2006 г.), научно-практическую конференцию с международным участием «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (Барнаул, 2007, 2008 гг.), IV Российскую научно-техническую конференцию «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2003 г.), 2-ю международную научно-практическую конференцию «Компьютер в современном мире» (Чита, 2000 г.), международную научно-техническую конференцию «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы» (Томск, 2003 г.), Международную научно-техническую конференцию «Автоматизация машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (Вологда, 2005, 2006 гг.), V Международную конференцию «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения» (Санкт-Петербург, 2003 г.), Международную научно-практическую конференцию «Электроэнергетика в сельском хозяйстве» (Новосибирск, 2009 г.).

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 разделов, основных выводов, библиографического списка из 517 наименований и 6 приложений.

Во введении обоснована актуальность проблемы повышения уровня эксплуатационной надежности электрических машин, сформулированы цель, задачи и методы исследований, научная новизна, практическая значимость работы, объект и предмет исследования, а также отражены вопросы апробации и реализации полученных научных результатов. Приводится краткое содержание каждого из разделов.

В первом разделе дан анализ современного состояния проблемы повышения надежности электродвигателей: исследован парк двигателей, эксплуатируемых на сельскохозяйственных предприятиях, выделены основные факторы, воздействующие на состояние электроизоляционной системы, проанализирова-

ны используемые методы и технические средства восстановления изоляции обмоток, а также обозначены основные пути повышения надежности ЭД на предприятиях АПК. Подробно рассмотрено применение информационно-логического анализа для выявления степени влияния основных факторов на наработку до очередного контроля состояния ЭД.

Во втором разделе рассмотрены методы и технические средства диагностики электродвигателей в агропромышленном комплексе, а также предложен комплекс диагностических средств на основе новых методик оценки состояния ЭД. Разработаны теоретические основы диагностики двигателей по зависимости гармонического состава их внешнего магнитного поля от степени развития дефектов: изучены проявления различных дефектов электродвигателя в спектре напряженности его ВМП, построены математические модели магнитного поля в воздушном зазоре двигателя, а также внешнего магнитного поля при витковых и фазных замыканиях. Экспериментально доказана зависимость изменений параметров ВМП от степени развития дефектов электродвигателя. Предложена система средств диагностики на основе измерения параметров волновых затухающих колебаний в обмотке двигателя, выбран обобщенный диагностический параметр, положенный в основу оптимизации режимов электротермовакuumной технологии пропитки и сушки, показана возможность применения результатов проведенных исследований для прогнозирования остаточного срока службы ЭД, произведен выбор показателей эффективности технологических процессов пропитки и сушки изоляции двигателей.

В третьем разделе представлены основные результаты теоретических исследований процессов теплопереноса в обмотках электрических двигателей, которые построены на применении системной методологии к анализу процессов переноса энергии и массы вещества, протекающих в твердых капиллярно-пористых телах. Следуя принципам системного анализа, рассмотрены основные и наиболее значимые процессы, определяющие качество изоляции и формирующие методы восстановления работоспособности электрических двигателей. Приведены разработанные математические модели процессов теплопереноса и обоснована целесообразность использования скоростного вакуумирования для интенсификации этих процессов. Решена система дифференциальных уравнений переноса энергии и массы вещества для электротепловой вакуумной пропитки и сушки, что позволило установить закономерности протекания данных процессов и получить уравнения для расчета ряда параметров разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток электродвигателей. Там же приведены результаты экспериментальных исследований процессов теплопереноса в теле обмотки электродвигателя. Реализованы сравнительные эксперименты и ускоренные лабораторные испытания по отысканию зависимости качества изоляции ЭД от режимов пропитки и сушки, по результатам которых построен ряд математических моделей изучаемых процессов.

1 ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Кризис, поразивший мировую экономику, с наибольшей силой обрушился на машиностроительный комплекс страны. Инвестиционный спад поразил центральную часть производственного процесса – рабочие машины и технологическое оборудование большинства основных отраслей народного хозяйства. Структурная перестройка сельского хозяйства, становление рыночной экономики, децентрализация снабжения хозяйств, новые формы и механизмы хозяйствования, моральное и физическое старение технологического оборудования, вызванное недостаточным финансированием отрасли, – все это привело к снижению уровня сельскохозяйственного производства до уровня начала 90-х гг. прошлого столетия [5, 107].

Безубыточная работа и эффективное функционирование в создавшихся условиях любого сельскохозяйственного предприятия обеспечивается минимизацией всех производственных издержек, которая достигается путем анализа бизнес-процессов, процессов обеспечения и менеджмента с последующим применением современных технических средств и электротехнологий. Системный анализ данных процессов позволил из комплекса существующих проблем низкой эффективности технологических процессов в сельском хозяйстве выделить проблему обеспечения безотказной работы установленного на предприятии электрооборудования, решение которой определяется надлежащей организацией системы повышения его надежности. При этом должна быть решена весьма сложная и важная задача по снижению затрат на восстановление работоспособности оборудования в процессе его обслуживания и ремонта. Особое значение вопрос повышения эксплуатационной надежности приобретает для электрического двигателя, как основного потребителя электроэнергии, направляемой для преобразования в механическую работу [108].

С точки зрения системного анализа в любом научном исследовании необходимо иметь четкое представление о различных сторонах изучаемого объекта. Конкретизация используемой терминологии и краткая информация по рассматриваемой проблеме являются неотъемлемым элементом анализа, способствующим правильному пониманию круга решаемых вопросов, а также сделанных в ходе выполнения работы выводов.

1.1 Структура парка электрических двигателей, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственного производства

В настоящее время асинхронный электропривод остается наиболее массовым типом привода в сельскохозяйственном производстве и основным потребителем электрической энергии. Выпуск электрических двигателей мощностью от 0,75 до 300 кВт в Российской Федерации составляет более 1 млн. шт. в год. При этом в различных отраслях и установках с тяжелыми условиями работы технологического электрооборудования (в т. ч. и в сель-

ском хозяйстве) коэффициент замены аварийных электродвигателей составляет от 0,5 до 2 [3].

На сегодняшний день широкое распространение в агропромышленном комплексе получили асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором [2, 4]:

- общепромышленных серий: А, АО, А2, АО2, 4А (4АМ, АИР), 5А, 6А, РА;
- специальных серий для сельского хозяйства: АО2...СХ, ДА...С, 4А...С и др.

При этом процентное распределение данных серий двигателей и их модификаций среди общего числа электрических машин на различных сельскохозяйственных предприятиях сложилось по-разному, что связано, прежде всего, с периодом интенсивного развития электрификации процессов производства в том или ином хозяйстве. По данным, полученным при обследовании сельхозпроизводителей Алтайского края [1, 2], распределение по сериям ЭД выглядело следующим образом – рисунок 1.1.

Аналогичная ситуация имеет место и в других регионах России и ряде стран ближнего зарубежья.

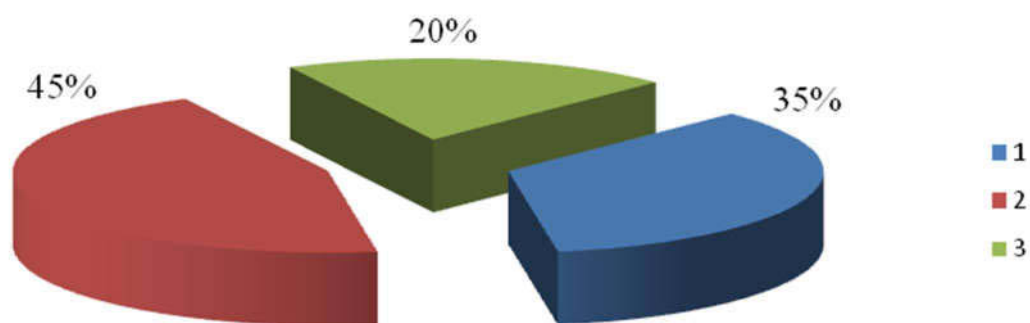


Рисунок 1.1 – Диаграмма распределения двигателей по сериям в сельском хозяйстве: 1 – АД первой и второй серий; 2 – серий 4А и 4АМ; 3 – АД других серий

В ходе исследования было установлено, что на животноводство и подсобные предприятия приходится около 80 % от общего числа электродвигателей, эксплуатируемых в различных отраслях сельского хозяйства [7, 8, 48, 57]. До 90 % двигателей закрытого исполнения общепромышленного назначения и 1 – 3 % серии ДА...С и АО2...СХ эксплуатируются на молочных фермах. При этом большинство животноводческих комплексов почти полностью оснащены двигателями серии 4А [15, 109].

Таким образом, примерно половину парка электродвигателей в сельском хозяйстве составляют асинхронные электродвигатели четвертой единой

серии общепромышленного применения, которые наименее всего приспособлены для работы в условиях агропромышленного комплекса страны.

1.2 Анализ факторов, влияющих на интенсивность протекания процессов старения и восстановления изоляции двигателей

Комплексные исследования условий и особенностей работы двигателей в сельском хозяйстве позволили установить приоритеты в ряду факторов, воздействующих на электрическую изоляцию с момента начала эксплуатации и заканчивая списанием [43]. Тогда процессы изменения свойств изоляции обмоток в результате ее старения и восстановления под действием эксплуатационных факторов различной природы могут быть представлены в виде некоторого объекта исследования, изображенного на рисунке 1.2 [13].

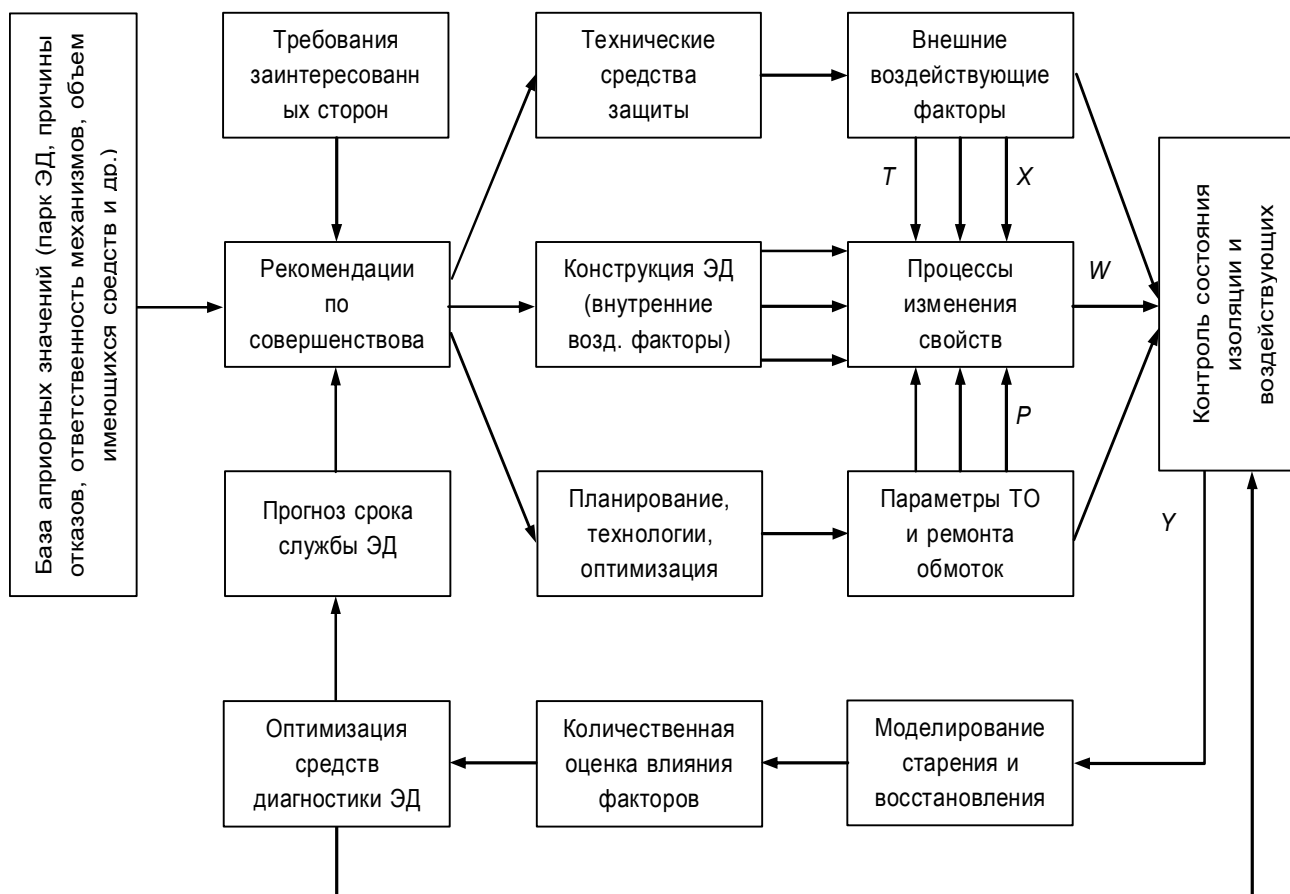


Рисунок 1.2 – Структура предлагаемой системы повышения надежности ЭД

1.2.1 Причины повреждений изоляции электрических двигателей и статистика выходов их из строя

В процессе эксплуатации в условиях сельскохозяйственного производства электрические двигатели взаимодействуют с окружающей средой, и повреждения изоляции часто являются следствием этого взаимодействия. При этом в зависимости от характера среды, ее воздействие на изоляционные материалы различно [42].

Так, в частности, изоляция, находящаяся на открытом воздухе, подвержена воздействию солнечных лучей, изменений атмосферных условий (температуры, давления, влажности воздуха), различных газов, минеральной и органической пыли, а также микробиологическому, биологическому и иному влиянию [48, 60, 61, 63].

Анализ результатов исследований, проведенных в Сибири, на Урале, средней полосе и в других областях России [9, 60 – 63, 110], показал, что исполнение асинхронных двигателей общепромышленного назначения во многих случаях не соответствует условиям среды сельскохозяйственных помещений. Кроме того, показатели микроклимата большинства животноводческих помещений превышают официальные зооветеринарные нормы, что в значительной мере влияет на срок жизни изоляции – агрессивные газы могут химически взаимодействовать с изоляционным материалом, что приводит к ускоренному снижению его электрической прочности [47].

Следует отметить отрицательное влияние, оказываемое на изоляцию в процессе ее восстановления, когда материалы подвержены сильным механическим нагрузкам и велика вероятность попадания химических примесей в материал. Например, канифоль, применяемая при пайках, а также некоторые компоненты, входящие в состав защитных мазей для рук, крепежные материалы и т. д., могут вызвать серьезные повреждения изоляции обмоток [111]. Большинство применяемых в настоящее время способов разрушения связующего обмоток сопровождаются выделением токсичных веществ, вызывающих коррозию металла, изменение размеров конструкции и другие дефекты, приводящие к значительному снижению к. п. д. двигателей, а при механическом способе извлечения обмотки ЭД повреждается наружная поверхность электротехнической стали. В свою очередь, сушка обмоток электрических двигателей в большинстве случаев осуществляется в сушильных печах, не позволяющих следить за температурным режимом, что сводит на нет все усилия по повышению качества выполнения ремонтных работ. Результатом подобного ремонта является уменьшение времени работы двигателя до 2 – 3 мес.

Таким образом, воздействия, вызывающие повреждение электроизоляционных материалов, оказывают влияние на состояние изоляции электродвигателя не только в процессе выполнения им требуемых функций, но и в ходе технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортировки. Более того, выход ЭД из строя обусловлен как уровнем и сочетанием воздействующих факторов, так и конструкцией и техническим состоянием его элементов [38]. В общем виде причины, вызывающие повреждение изоляции, можно разделить, что подтверждают и результаты ранее выполненных исследований [112], на следующие группы:

- влияние окружающей среды;
- тепловые воздействия;
- механические воздействия;
- электрические воздействия.

Одной из отличительных особенностей эксплуатации электродвигателей в сельском хозяйстве является сезонность их работы. Так, ЭД животноводческих ферм работают лишь в стойловый период, задействованные на орошении и на агрегатах сушки трав – в летнее время, а на обработке зерна – в период уборки. Кроме того, достаточно распространенным явлением в сельскохозяйственном производстве являются длительные простои технологического ЭО, вызванные выходом двигателей из строя. При этом значительная часть простоев продолжительностью от 8 ч до 2 суток приходится на потребителей первой и второй категории надежности, что значительно превосходит предельно допустимые значения перерывов [4, 9, 65].

Наряду с сезонностью, крайне важным следует признать сочетание режима работы электродвигателя с отрицательным воздействием на изоляционные материалы окружающей среды. В случае длительных простоев технологического электрооборудования в среде с высокой относительной влажностью изоляция обмоток электрических двигателей подвергается периодическому увлажнению, а ее сопротивление уменьшается до 0,5 МОм. Кроме того, из расчетных и опытных данных [10] следует, что повышение температуры окружающей среды вызывает ухудшение охлаждения двигателей и приводит к росту потерь в обмотке. В частности, у подвергшихся испытанию ЭД превышение температуры обмотки составляет, в среднем, 8 °С на каждые 10 °С увеличения температуры окружающей среды [113, 114]. Очевидно, что кроме влияния материала изоляции на описанный процесс необходимо учитывать воздействие технологии ее изготовления, а также пропитки и сушки обмоток [111].

Опыт эксплуатации технологического электрооборудования на сельскохозяйственных предприятиях страны [49, 66, 86, 87, 115, 116] показал

существенное влияние вибрационных процессов на надежность двигателей общепромышленных и специальных серий. Анализ данных [4, 6, 115], полученных при измерении вибрационной скорости статора в установившемся режиме, позволил сделать вывод о том, что диапазон вибрации электродвигателей в сельскохозяйственном производстве гораздо шире предусмотренного техническими условиями и для различных производственных процессов (кормоприготовление, доение, вентиляция и др.) превышает предельно допустимый в 2 – 8 раз.

Еще одной из характерных особенностей эксплуатации электрических машин в сельском хозяйстве является низкое качество питающего напряжения. Из-за значительной протяженности сельских сетей, наличия большого количества однофазных потребителей и неравномерного их распределения по фазам в электрических сетях имеет место значительная несимметрия напряжения (от 0,3 до 2,5 %), а также его серьезные колебания (от – 25 до 20 % от номинального).

Таким образом, все перечисленные особенности эксплуатации и ремонта электродвигателей в условиях сельскохозяйственного производства в той или иной степени оказывают влияние на надежность их работы.

Анализ количественных показателей выхода ЭД из строя позволил получить достаточно адекватную картину сложившейся на сегодняшний день в агропромышленном комплексе России ситуации по отказам электрооборудования. Так, в настоящее время более 60 % отказов электродвигателей приходится на время их напряженной работы (посевная и уборочная компании). При этом убытки от простоя каждого ЭД составляют от 300 до 10000 руб. в сутки [117]. Кроме того, возникают ситуации, когда отказавший электрический двигатель, установленный на ответственном технологическом оборудовании, не имеет регламентированного системой ППР подменного резерва, а на расчетном счете хозяйства отсутствуют средства для его оперативного ремонта. Как следствие, убытки от отказа двигателя значительно превосходят стоимость нового ЭД и наносят хозяйству значительный экономический ущерб.

Для оценки динамики отказов электродвигателей при непосредственном участии автора были проведены статистические исследования по сопоставлению аварийности ЭД во времена СССР, когда действовала система ППР, и в настоящее время. Для удобства выполнения данных исследований была выбрана группа хозяйств, функционирующих со времен СССР. Информация по отказам двигателей за 2009 г. приведена в таблице 1.1, а аналогичные показатели 1988 г. сведены в таблицу 1.2.

Таблица 1.1 – Количество вышедших из строя электродвигателей в ряде хозяйств Алтайского края за 2009 г.

Наименование предприятия	Количество установленных ЭД	Количество отказавших ЭД	В % от числа установленных
ЗАО «Белоярское»	38	6	16
Колхоз «Заря»	127	32	25
ЗАО «Бурановское»	86	10	12
Ащегульское коллективное сельхозпредприятие	91	9	10
ОАО «Великий октябрь»	158	41	26
Совхоз «Зеленый клин»	164	37	23
КГУП «Центральный»	152	24	16

Таблица 1.2 – Количество вышедших из строя электрических двигателей в ряде хозяйств Алтайского края в 1988 г.

Наименование предприятия	Количество установленных ЭД	Количество отказавших ЭД	В % от числа установленных
Колхоз «Белоярский»	49	4	8
Колхоз «Заря»	162	26	16
Совхоз «Бурановский»	144	12	8
Совхоз «Ащегульский»	87	5	6
Колхоз «Великий октябрь»	236	32	14
Совхоз «Зеленый клин»	179	20	11
Колхоз «Центральный»	260	18	7

Анализ полученных данных показал, что, несмотря на сокращение парка двигателей за период с 1988 по 2009 гг., процент их выхода из строя увеличился, в среднем, в 2 раза. В свою очередь, согласно [118], за аналогичный период стоимость ремонта ЭД относительно стоимости нового электродвигателя возросла с 19 – 20 % до 28 – 30 %. Все это привело к тому, что затраты на ремонт электрооборудования увеличились, в среднем, в 3 раза. Другими словами, эффективность организации технического обслуживания и ремонта электрооборудования в агропромышленном комплексе России и стран СНГ на сегодняшний день является неудовлетворительной.

Исследования надежности электродвигателей общепромышленного назначения [4, 9, 108, 119] показывают, что на сельскохозяйственных предприятиях ежегодно по тем или иным причинам выходят из строя 20 – 30 % ЭД, а их

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	19
1.1 Структура парка электрических двигателей, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственного производства	19
1.2 Анализ факторов, влияющих на интенсивность протекания процессов старения и восстановления изоляции двигателей	21
1.2.1 Причины повреждений изоляции электрических двигателей и статистика выходов их из строя	22
1.2.2 Методы и технические средства восстановления работоспособности электродвигателей в процессе эксплуатации и ремонта	28
1.3 Состав и основные элементы предлагаемой системы повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве	35
1.4 Количественная оценка степени влияния воздействующих факторов на надежность электрических двигателей	44
1.4.1 Анализ методов описания неопределенностей в задачах мониторинга сложных процессов	45
1.4.2 Математическое моделирование в условиях нечеткой логики	46
1.4.3 Использование информационно-логического анализа при изучении влияния различных факторов на срок службы двигателя	49
1.5 Основные результаты и выводы по разделу	56
2 МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ	59
2.1 Современные методы диагностики электрических двигателей, используемых в сельском хозяйстве	59
2.2 Теоретическое обоснование диагностики электродвигателей на основе зависимости гармонического состава напряженности их внешнего магнитного поля от степени развития дефектов	62
2.2.1 Исследование природы и источников внешнего магнитного поля электрических двигателей.....	62

2.2.2 Анализ проявления различных дефектов электродвигателя в спектре напряженности его внешнего магнитного поля	66
2.2.3 Моделирование внешнего магнитного поля электрического двигателя при витковых и фазных замыканиях	76
2.3 Экспериментальные исследования зависимости параметров магнитного поля электродвигателя от степени развития дефектов	80
2.4 Метод диагностики электрических двигателей на основе анализа спектра напряженности их внешнего магнитного поля	91
2.5 Система технических средств диагностики на основе измерения параметров волновых затухающих колебаний в обмотке двигателя	95
2.5.1 Теоретические исследования влияния конструктивных и внешних воздействующих факторов на параметры волновых затухающих колебаний в обмотке электродвигателя	97
2.5.2 Метод оценки технического состояния изоляции электрических двигателей на основе анализа параметров волновых затухающих колебаний в обмотке	114
2.5.3 Экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров изоляции на параметры схемы замещения двигателей.....	119
2.6 Выбор и обоснование показателей эффективности технологических процессов пропитки и сушки изоляции электрических двигателей.....	122
2.7 Основные результаты и выводы по разделу	126
3 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗОЛЯЦИИ	129
3.1 Теоретические исследования процессов переноса энергии и массы вещества, протекающих в твердых капиллярно-пористых телах, и обоснование принципов их интенсификации	129
3.1.1 Анализ факторов, влияющих на качество восстановленной изоляции обмоток двигателей в ходе обслуживания и ремонта	133
3.1.2 Математическое описание процесса разрушения связующего обмоток электрических двигателей	137

3.1.3 Повышение эффективности пропитки обмоток электродвигателей посредством интенсивного изменения давления	146
3.1.4 Математическое моделирование процесса массопереноса в теле обмотки электродвигателя при скоростном вакуумировании	152
3.1.5 Анализ изменения свойств изоляции обмоток статоров электродвигателей в различных условиях пленкообразования	161
3.2 Экспериментальные исследования процессов теплопереноса в обмотках электрических двигателей при восстановлении изоляции	165
3.2.1 Комплекс экспериментов по пропитке и сушке изоляции электродвигателей различными методами	168
3.2.2 Результаты экспериментальных исследований процессов пропитки и сушки скоростным термовакuumным методом	173
3.2.3 Динамика изменения обобщенного диагностического параметра при восстановлении изоляции электрических двигателей	178
3.2.4 Анализ режимов функционирования технологических установок по пропитке и сушке изоляции электродвигателей	182
3.3 Основные результаты и выводы по разделу	189
4 ЭЛЕКТРОТЕРМОВАКУУМНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОПИТКИ И СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....	192
4.1 Стационарная и мобильная установки термовакuumного разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток ЭД.....	194
4.2 Система информационно-программного сопровождения электротермовакuumной технологии восстановления изоляции электрических двигателей.....	200
4.2.1 Схема автоматизации работы технологической установки разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции двигателей	203
4.2.2 Выбор управляющих воздействий на процессы разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции	207
4.3 Оптимизация параметров технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей	209
4.3.1 Общий подход к оптимизации параметров процесса восстановления изоляции электродвигателей	210

4.3.2	Постановка и алгоритм решения задачи оптимизации параметров процесса пропитки и сушки изоляции двигателей	211
4.3.3	Представление технологического процесса восстановления изоляции обмоток в пространственной модели оптимизации	216
4.3.4	Методики оптимизации параметров технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей	221
4.4	Основные результаты и выводы по разделу	238
5	СИТУАЦИОННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ ДИАГНОСТИКИ	240
5.1	Анализ методов планирования работ по ремонту электрических двигателей на предприятиях АПК	241
5.2	Исследование системы организации ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве как системы их массового обслуживания	246
5.2.1	Анализ систем с неограниченным потоком требований при ремонте электрических двигателей сторонними организациями	257
5.2.2	Показатели функционирования хозяйства при собственной системе ремонта отказавших электродвигателей	261
5.3	Оптимизация параметров системы организации ремонта электрических двигателей в сельском хозяйстве	278
5.4	Прогнозирование технического состояния электрических двигателей, эксплуатирующихся в условиях агропромышленного комплекса	284
5.4.1	Разработка экспертной системы прогнозирования наработки до очередного диагностического контроля электродвигателей	285
5.4.2	Определение логических зависимостей параметров спектра напряженности внешнего магнитного поля электрического двигателя от степени развития различных дефектов	287
5.4.3	Количественная оценка наработки до очередного диагностического контроля двигателя с учетом влияния условий эксплуатации	290
5.5	Основные результаты и выводы по разделу	301
	ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	304
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	307
	ПРИЛОЖЕНИЯ	351